# 装药结构热安全性试验方法及其特点分析

# 张中礼,吴松,鲁亮,胡宇鹏

(中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:目的 在装药结构的热安全性试验时选择合理的加热方法。方法 从燃料、加热速率、温度范围、温 度可控性、温区可控性、对试件影响等方面对开放油池火烧、可控喷射火烧、红外辐射灯阵、电加热带、 电加热箱等常用的加热方式进行对比分析。结果 对于快烤加载,红外辐射灯阵兼具开放油池火烧和可控喷 射火烧的优势,能够实现温度为 800~1200 ℃、升温速率不低于 200 ℃/s、温度控制偏差不大于 5%的模拟火 烧温度稳定控制,且具备清洁环保的优势;对于慢烤加载,红外辐射灯阵兼具电加热带和电加热炉加载的 优势,能够实现温升速率 3.3 ℃/h~1.0 ℃/min 可调节,加热温度不低于 400 ℃,温度分区不低于 4 个的分区 慢速烤燃温度控制,且不会给试样反应等级带来额外影响。结论 合理选择慢烤、快烤加热方式,避免对装 药结构的反应等级产生影响,是装药结构的热安全性试验时需重视的一个问题。

关键词: 装药结构; 快烤试验; 慢烤试验; 温度可控性; 红外辐射灯阵

中图分类号: TJ55; O64 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2021)05-0028-06 **DOI**: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.005

# Characteristics of the Fast/Slow Cook-off Experimental Methods for Ammunition Structures

ZHANG Zhong-li, WU Song, LU Liang, HU Yu-peng (Institute of System Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT:** In order to choose an optimized heating methods of the thermal safety performance for ammunition structures. The comparison analysis from the aspects of fuel, heating rate, temperature range, temperature controlled, and its effects to ammunition reaction of the open pool fire, controlled propane jet fire, electric heating swathes, electric heating case and infrared radiation lamps array. For fast cook-off test heating methods, the infrared radiation lamps array had the advantages of open pool fire and improved temperature controlled propane jet fire. It could imitated the flame temperature whose temperature region was located 800~1200 °C, temperature rising rate was not lower than 200 °C/s, temperature offset was not greater than 5% and had advantage of cleanness and environmental protection. For slow cook-off test heating methods, the infrared radiation lamps array had the advantages of electric heating swathes and electric heating case. It could imitated the slow cook-off temperature whose

收稿日期: 2021-03-29; 修订日期: 2021-04-06

Received: 2021-03-29; Revised: 2021-04-06

基金项目:中国工程物理研究院规划项目资助(TCGH0408)

**Fund:** Supported by the Program of Chinese Academy of Engineering Physics (TCGH0408)

作者简介:张中礼(1984—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向武器装备热安全性。

Biography: ZHANG Zhong-li (1984-), Male, Master, Senior engineer, Research focus: heat safety of equipment.

通讯作者:胡宇鹏(1986-),男,博士,高级工程师,主要研究方向工程热物理。

Corresponding author: HU Yu-peng (1986—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: engineering thermophysics.

引文格式:张中礼,吴松,鲁亮,等.装药结构热安全性试验方法及其特点分析[J].装备环境工程,2021,18(5):028-033.

ZHANG Zhong-li, WU Song, LU Liang, et al. Characteristics of the fast/slow cook-off experimental methods for ammunition structures[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 028-033.

temperature region was not lower than 400  $^{\circ}$ C, temperature rising rate was regulated between 3.3  $^{\circ}$ C/h~1.0  $^{\circ}$ C/min, temperature domains were not fewer than 4 and could not produce added influence to the reacting degree. Optimized choosing of the fast/slow cook-off heating methods which avoided effecting the reaction degree of ammunition was an important problem for the heating safety test of ammunition structures.

**KEY WORDS:** ammunition structures; fast cook-off test; slow cook-off test; temperature controlled; infrared radiation lamps array

装药结构在意外火灾或敌方打击下易处于较为 苛刻的热环境,即对装药结构形成热刺激环境。当炸 药所在环境达到某一温度,将形成热点,导致炸药的 热点火,甚至引发连锁爆炸后果,尤其大型舰艇舰载 弹药在遭受意外热刺激下出现的一系列安全事故尤 为惨痛,已引起各国高度重视。因此,装药结构在热 刺激下的热安全性试验(热烤)是弹药安全性研究的 重要内容之一。根据其升温速率的不同,将含炸药结 构的热烤试验分为快烤和慢烤试验<sup>[1]</sup>,慢烤试验的升 温速率一般小于 0.05 ℃/s,快烤试验的升温速率大于 1 ℃/s。热烤试验装置、热烤试验方法及计算仿真方 法研究是热烤试验研究的主要方向<sup>[2]</sup>,尤其是通过热 烤环境下的温度、压力、壳体破裂运动等可视化/量 化的状态反应参量测试诊断和仿真预测技术评估其 反应等级更是当前的研究重点<sup>[3-6]</sup>。

国内针对装药结构热烤试验主要参照 2003 年形 成的美军标 MIL-STD-2105C《非核弹药危险性评估 试验》及其 2011 年发布的 MIL-STD-2105D。对于快 烤试验,主要采用油池火烧方式<sup>[7]</sup>进行试验加载,其 燃料主要有燃油、酒精、木材等,其对于装药结构所 受火灾快烤环境具有较好的等效性,但存在燃烧时间 控制具有一定难度,温度受环境风速和空气流动影响 较大,且伴随着火烧过程产生气体及颗粒污染物排放 的问题。对于慢烤试验,主要采用电加热丝(带)<sup>[8-9]</sup>、 电加热炉(箱)<sup>[10-11]</sup>和石英灯阵辐射方式<sup>[12]</sup>。3种加 热方式均能较好地实现慢烤温升控制,但不同热传递 形式的温度可控性不同,适用于不同的温控目标。不 同约束条件下装药快烤试验研究表明,装药最终响应 的剧烈程度与其所受约束强度成正相关[13],不同加热 方式对装药反应约束强度的改变,可能导致不同的装 药反应剧烈程度。

针对装药结构不同热加载方式的传热特性和不 同产品的温控要求及反应情况,文中对开放空间油 池火烧、可控喷射火烧、石英灯阵辐射 3 种快烤试 验方法,电加热丝(带)、电加热炉和石英灯阵辐射 3 种慢烤试验方法,从不同加载方式的主要传热形 式、温度可控性、污染物排放及加载方式对装药反 应等级可能产生的影响进行分析讨论,分析了各加 热方法的特点。

# 1 试验加载方法

### 1.1 开放油池火烧试验

作为最常用的快烤试验方法,开放油池火烧试验 通过采用一定尺寸的油池(油盘),添加有机燃料作 为加热材料,直接加热试样。油池火烧环境所提供的 热流密度,至少相当于表面吸收系数为0.8的试件在 周围空气静止的环境下,完全暴露在平均辐射系数不 小于 0.9、平均温度不小于 800 ℃的烃类燃料/空气火 焰中所受到的热流密度。火烧试验设施应使试件直接 置于包覆厚度为 1~3 m 的火焰中, 试件底部距离液面 的安装高度在 0.6~1 m。火焰辐射系数与火焰总衰减 系数K、火焰场总压力P和火焰平均射线行程L有关。 对于常规的煤油类火烧试验,火焰包覆厚度在1~3m, 能够使其平均辐射系数达到不小于 0.9 的要求,同时 试验过程中产生的大量炭黑附着在试件表面,使得试 件表面吸收系数满足不低于 0.8 的要求。对火焰场温 度测试及数值模拟结果均表明,火焰场温度在高度方 向上呈现如下规定分布:在0.6m高度处,火焰平均 温度可达到 900 ℃以上,最高可达 1000 ℃以上;在 1.0 m 高度处,火焰温度平均值可达 800 ℃以上;在 0.6~1.5 m 的高度区间,随高度的升高,火焰场温度 呈下降趋势[14]。

火焰场包覆和温度均易受试验时风速和风向的 影响,有人通过数值模拟研究<sup>[15]</sup>分析了横向风对试件 周围火焰热辐射通量分布产生的影响。验证了在风速 为2m/s时,试件周围的热辐射通量基本上仍呈现对 称分布,低于2m/s的风速不会对油池火烧试验产生 较大影响,而当风速超过2m/s后,火焰将无法包覆 整个试件,会影响试验周围火焰厚度的一致性,下风 向火焰的热辐射通量增大,试件附近的火焰热辐射通 量降低。当火烧试验过程处于无风或微风状态时(如 图1所示),煤油火焰将试件包覆良好,试件附近各 方向的火焰温度基本保持在 800℃以上。

### 1.2 可控喷射火烧试验

针对开放油池火烧试验加热速度、火焰温度、加 热时间等控制困难以及污染排放的问题,2006 年美 国 Atwood 等<sup>[16]</sup>研究设计了可控火烧试验系统(见图 2)。该系统更换燃料种类为丙烷,改变燃料供给方式

 a 油池火烧试验系统
 1200

 1200
 1200

 1200
 1000

 1200
 1000

 1000
 1000

 1000
 1000

 1000
 1000

 1000
 1000

 1000
 117:40

 117:40
 18:00

 北京时间
 18:00

 比京时间
 18:00



Fig.1 The picture of fire test system and temperature graph of different directions: a) the fire test system; b) the temperature graph of different directions



图 2 可控火烧试验系统和装置[1]

Fig.2 Sketch and picture of temperature controlled fire system<sup>[1]</sup>: a) sketch of temperature controlled fire system; b) picture of temperature controlled fire system

为雾化喷射,通过控制燃料喷射速率和空气吹入速度,实现火烧温度和热流输出的稳定控制,同时解决了燃烧时间的控制问题,大幅降低了火烧试验的污染物排放<sup>[17]</sup>。

### 1.3 红外辐射灯阵试验

石英灯辐射加热是航天飞行器结构热试验中使 用最为广泛的启动热模拟方式,其加热热流场计算、 平板及锥形等各类形状石英灯加热器设计及影响因 素等均已有深入研究<sup>[18-19]</sup>。已有研究者采用石英灯 阵辐射加热器开展了室温至 800 ℃、50 ℃/s 温升速 率热边界模拟试验<sup>[20]</sup>,表明石英灯阵辐射加热方式具 备模拟火烧试验环境 800~1000 ℃的能力。文中研制 的平板辐射加热系统采用红外辐射灯阵能够模拟火 烧环境的热流和温度条件,灯阵辐射装置具备快速升 温能力,能够使试件表面在 1 min 内由室温上升至满 足火烧环境条件要求的温度。在温度保持阶段,辐射 灯阵装置所得到的温度加载曲线波动较小,辐射灯阵 快烤加载装置及其加载曲线如图 3 a 和图 4 a 所示。 经校准表明,该装置可以实现最高温度为 1200 ℃, 最大偏差为 40 ℃ (3.3%),小于 5%的预定目标,最 大温升速率不小于 200 ℃/s,最大温升速率误差为 5.7%。

辐射灯阵加载系统同时具备较慢温升速率的烤 燃试验加载能力。采用半圆形石英灯管组成石英灯 阵,对圆柱或圆锥状试件进行可控温升的辐射热加 载,使试件内部炸药达到热点火反应温度,发生烤燃 反应,其升温速率从 3.3 ℃/h~1 ℃/min 可调节,加热 温度不低于 400 ℃。还可根据点火位置的需要,采用 分区控温的方法,实现不低于 4 个温度的协调控制, 控制不同区域的温升曲线如图 3 b 和图 4 b 所示,达 到指定位置装药发生热点火的加载效果,控制炸药点 火位置和不同区域的预热深度,使炸药在热点火前达 到预期的温度分布,而非均匀加载可能导致的过试验 条件加载。

#### 1.4 电加热带和电加热炉

电加热带缠绕和电加热炉作为常规慢速烤燃加载方法(如图 5 所示),一般以装药结构表面或装药 表面的测点作为温度控制点,可以按照指定的温升速 率进行加热,直至炸药发生反应。试验研究发现,采 用电加热带作为加载装置,装药结构反应时,薄弱泄



a 快烤试验装置



b 慢烤试验装置

图 3 石英灯阵快慢烤加载系统

Fig.3 The picture of fire/slow test system by infrared radiation lamps array: a) the picture of fire test system; b) the picture of slow test system



图 4 石英灯阵快慢烤试验加载曲线

Fig.4 The temperature graphs of fire/slow test system by infrared radiation lamps array: a) fire test system; b) slow test system



a 电加热带慢烤试验



b电加热炉(箱)慢烤试验图 5 电加热带和高温烤箱慢烤试验系统

Fig.5 The picture of slow cook-off test system by electric heating swathes and electric heating case: a) the picture of slow cook-off test system by electric heating swathes; b) the picture of slow cook-off test system by electric heating case

压部位被加热带缠绕,可能使某些结构约束增强,导 致发生更高等级的反应。例如在对某装药结构进行慢 烤试验时,采用电加热炉慢烤试验装药的反应等级为 燃烧反应,而在采用加热带缠绕的试验件发生了等级 更高的爆炸反应,因此对于某些结构设计有薄弱环节 的装药结构,采用加热带缠绕的加载方式可能使设计 失效<sup>[21]</sup>。

对某周向带泄压孔的装药结构慢烤试验,采用相同的加载曲线,电加热箱和电加热带慢烤试验装药结构发生反应的时间均为 280 min 左右。电加热带试验 装药发生反应时,瞬间发生剧烈爆炸,温度测试系统 在快速上升时测试中断。电加热箱试验装药发生反应 时,排气孔处喷出火焰,燃烧约 1 min 后,火焰熄灭, 开始冒烟,浓烟充满整个试验箱内。直至装药反应结 束,弹体结构保持完整,未发生移动,弹体表面各测 点在反应前温度快速上升,最高温度分别达到 549.5、 448.9、383.6℃,反应等级为燃烧。试验加载温度如 图 6 所示。

## 2 几种加热方式特点分析

### 2.1 快烤试验加载分析

3 种快烤试验加载方式的对比见表 1。采用开放 油池火烧进行试验加载,主要通过火焰场辐射和对流 换热的形式进行热交换。在试验开始后,温度不可控, 易受自然环境风速、风向影响,使火焰偏离,导致试 验件受热环境达不到相应标准规定的要求。同时油池 火一般采用煤油作为燃料,火烧过程产生较严重的污 染。采用丙烷作为燃料的可控喷射火烧试验技术作为 温度可控,更为清洁的快烤试验方式,具有显著的优

Tab.1



图 6 电加热带和电加热箱慢烤试验各加载点温度变化曲线 Fig.6 The temperature graphs of slow cook-off by (a) electric heating swathes and (b) electric heating case

表 1 3 种快烤试验加载方式对比 Comparison of the three fast cook-off test methods

14011 00	impunison or a			, in test methous
加载方法	主要传 热形式	温度可 控性	污染物 排放	加热方式对装 药反应的影响
开放油池 火烧	辐射+对流 换热	不可控	较严重	无
可控喷射 火烧	辐射+对流 换热	可控	较少	可能导致反 应等级上升
红外辐射 灯阵	辐射换热	可控	无	无

势,但对于装药结构可能发生爆炸以上的反应的情况,可控喷射火烧装置的管壁可能导致其反应等级上升。采用红外辐射灯阵加热技术,以辐射热流作为试验加载的热流输入,升温速率、温度曲线可控,温度均匀性好,不易受自然风速、风向的影响,试验加载 直接导致的污染物排放几乎为零。红外辐射灯阵加热 方法同时兼具开放油池火烧和可控喷射火烧试验方 法的优点,不会因为加热方式对装药反应造成影响。

### 2.2 慢烤试验加载分析

3 种慢烤试验加载方式的对比见表 2。以电加热 带或电加热片作为常规慢烤试验的加载方式,其温升 速率可控性好,且根据不同的加热功率和控制算法配 置,可以实现不同区域不同温升速率的分区控制加 载,使得模拟导弹整体快慢烤情况下内部装药结构不 同部位在不同升温速率下的慢速烤燃试验得以实现。 在摸清装药结构热边界条件的情况下,采用装药结构 部件替代导弹整体进行安全性烤燃试验成为可能。根 据已进行的多发烤燃试验结果来看,在针对某些存在 薄弱环节的装药结构加载时,电加热带可能使设计失 效,从而导致装药反应等级提升。采用电加热箱进行 慢烤试验,其温升速率可控性好,温度均匀性较好, 但不能对试验件不同区域不同温升速率进行分区控 制加载,只能进行均匀加载。由于试验件周围介质透 明,可通过烤箱观察窗对试验件反应过程进行直观观 察。采用石英灯阵辐射加载进行慢烤试验,其温升速 率可控性好,温度均匀加载和不同温升速率分区控制 加载均易于实现,且试验件周围介质透明,便于对试 验件反应过程进行直观观察和记录。由于加载装置与 试验件之间未发生接触,不存在装药结构约束增强 或泄压通道堵塞等问题,不会导致装药结构反应等 级提升。

表 2 3 种慢烤试验加载方式对比

rab.2 Comparison of the three slow cook-off test methods					
加载方法	主要传热 形式	温度可控性	加热方式对装 药反应的影响		
电加热带(片)	导热	均匀加载和 分区加载	可能导致反 应等级上升		
电加热炉(箱)	辐射+对流 换热	均匀加载	无		
红外辐射加热	辐射换热	均匀加载和 分区加载	无		

# 3 结论

1)开放油池火烧作为常用快烤试验加载方式, 其温度不可控,且存在较严重污染物排放的缺陷。可 控喷射火烧采用更清洁的丙烷火烧作为替代,其温度 可控性好,污染物排放较少,但火烧装置燃烧室的管 壁可能导致装药反应等级上升。红外辐射加热兼具开 放油池火烧和可控喷射火烧试验方法的优点,在降低 污染和温度可控性方面具有明显的优势,同时不会因 为试验装置给装药反应等级造成影响。

2)电加热带作为常用慢烤试验加载方式,能够 实现均匀加载和分区加载不同的控制模式,但加热带 缠绕可能导致装药结构薄弱环节或泄压通道失效,从 而提升装药反应等级。电加热箱加载时,试验件与试 验装置之间无接触,不会导致装药反应等级提升,但 仅能实现均匀加载。石英灯红外辐射兼具电加热带和 电加热箱加载方式的优点,具有良好的温度可控性, 能够实现均匀加载和分区加载不同的控制模式,且不 会因为试验装置给装药反应等级造成影响。

#### 参考文献:

- 冯长根,张蕊,都振华. 热烤试验研究进展[J]. 科技导报, 2012, 30(33): 68-73.
   FENG Chang-gen, ZHANG Rui, DU Zhen-hua. Progress in cook-off test[J]. Science & technology review, 2012, 30(33): 68-73.
- [2] 张蕊,姚朴,冯长根,等. RDX 炸药的热安全性综合评价[J]. 含能材料, 2004, 12(A01): 286-291.
   ZHANG Rui, YAO Pu, FENG Chang-gen, et al. The synthetically estimate of thermal safty of RDX[J]. Chinese journal of energetic materials, 2004, 12(A01): 286-291.
- [3] 秦国圣,都振华,王可暄,等. HNS 多点阵列装药慢速 烤燃试验研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 34-39.
   QIN Guo-sheng, DU Zhen-hua, WANG Ke-xuan, et al. Slow cook-off test of hns multi-point array charge[J].
   Equipment environmental engineering, 2019, 16(9): 34-39.
- [4] 颜密,田小涛,王绍增,等.自由填装固体火箭发动机
   的快烤响应特性试验[J].固体火箭技术,2020,43(1):
   95-100.

YAN Mi, TIAN Xiao-tao, WANG Shao-zeng, et al. Experimental study on response characteristics of free-loading solid rocket motor in fast cook-off test[J]. Journal of solid rocket technology, 2020, 43(1): 95-100.

- [5] 刘文一, 焦冀光. 固体发动机装药热安全性数值分析
  [J]. 装备环境工程, 2016, 13(2): 129-133.
  LIU Wen-yi, JIAO Ji-guang. Numerical analysis on the thermal safety of solid rocket motor propellant[J].
  Equipment environmental engineering, 2016, 13(2): 129-133.
- [6] 徐洪涛,金朋刚. 炸药缓慢加热条件实验技术进展[J]. 装备环境工程,2019,16(9):129-133.
   XU Hong-tao, JIN Peng-gang. Development of slower cook-off test for explosives[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(9): 129-133.
- [7] 高立龙, 王晓峰, 南海, 等. PMX-1 炸药易损性试验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(6): 699-701.
  GAO Li-long, WANG Xiao-feng, NAN Hai, et al. Experimental study on vulnerability of the explosive PMX-1[J]. Chinese journal of energetic materials, 2010, 18(6): 699-701.
- [8] 王晓峰,戴蓉兰,涂建.传爆药的烤燃试验[J].火工品, 2001(2): 5-7.
   WANG Xiao-feng, DAI Rong-lan, TU Jian. Cookoff tests of booster explosives[J]. Initiators & pyrotechnics, 2001(2): 5-7.
- [9] 李娜, 吕春玲, 王杰, 等. 低成本高效慢速烤燃试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(9): 18-23.
   LI Na, LYU Chun-ling, WANG Jie, et al. Low cost and high efficiency slow cook-off test method[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(9): 18-23.
- [10] 薛超阳, 智小琦, 王帅, 等. 某引信及其等效构件的慢速烤燃试验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 962-967 XUE Chao-yang, ZHI Xiao-qi, WANG Shuai, et al. Study of cook-off of a fuze and its equivalent components[J]. Acta armamentarii, 2019, 40(5): 962-967.
- [11] 李翊,赵继伟,霍菲.国外固体发动机慢烤安全性评估

技术[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(6): 897-902.

LI Yi, ZHAO Ji-wei, HUO Fei. Solid rocket motor slow-cookoff safety evaluation technology in foreign countries[J]. Journal of solid rocket technology, 2015, 38(6): 897-902.

- [12] 韩炎晖,娄文忠,冯跃,等. 慢速烤燃环境下引信热响 应特性测试与仿真[J]. 兵工学报, 2019, 40(5): 946-953.
  HAN Yan-hui, LOU Wen-zhong, FENG Yue, et al. Measurement and simulation of thermal response characteristics of fuze in slow cook-off test[J]. Acta armamentarii, 2019, 40(5): 946-953.
- [13] 程波,李文彬,郑宇,等.不同约束条件下 ANPyO 炸药快烤试验研究[J].爆破器材,2013,42(5):53-56. CHENG Bo, LI Wen-bin, ZHENG Yu, et al. Study on ANPyO explosive in fast cook-off test under different constraint conditions[J]. Explosive materials, 2013, 42(5): 53-56.
- [14] SHI Guang-mei, LI Ming-hai, HU Shao-quan, et al. Analysis of flame characteristic of kerosene pool fire[J]. Advanced materials research, 2014, 875-877: 828-834.
- [15] 史光梅, 李明海, 胡绍全等, 横向风对油池火烧试验的 影响[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 86-90. SHI Guang-mei, LI Ming-hai, HU Shao-quan, et al. Effects of cross wind on kerosene pool fire test[J]. Equipment environmental ENgineering, 2010, 7(6): 86-90.
- [16] ATWOOD A I, WILSON K J, LAKER T S, et al. Development of subscale fast cook-off test[R]. US: Naval Air Warfare Center Weapons Division, 2006.
- [17] WASHBURN E, HUBBLE D, YAGLA J, et al. Liquid-fuel fire alternative[R]. US: Naval Air Warfare Center Weapons Division, 2018.
- [18] 孔凡金,刘宝瑞,王龙,等.石英灯加热器热流场计算 方法比较[J]. 航天器环境工程,2020,37(1):47-53. KONG Fan-jin, LIU Bao-rui, WANG Long, et al. Comparative analysis of calculation methods for heat flux field of the quartz lamp radiant heater[J]. Spacecraft environment engineering, 2020, 37(1):47-53.
- [19] 夏吝时,齐斌,张昕,等. 防隔热试验用平板型石英灯 加热器热环境分析[J]. 红外技术, 2016, 38(7): 617-621. XIA Lin-shi, QI Bin, ZHANG Xin, et al. The thermal-environment analysis of flat quartz lamp heater system for thermal protection & insulation test[J]. Infrared technology, 2016, 38(7): 617-621.
- [20] 夏吝时,杨驰,张凯,等. 平板式石英灯高温红外加热 试验系统的研制与应用[J]. 工业加热, 2017, 46(5): 1-7. XIA Lin-shi, YANG Chi, ZHANG Kai, et al. Development and application of high temperature infrared heating test system for flat quartz lamp[J]. Industrial Heating, 2017, 46(5): 1-7.
- [21] 牛公杰,钱立新,梁斌,等.热作用下压力缓解结构对 厚壳体装药反应影响的试验研究[R]. 绵阳:中国工程 物理研究院总体工程研究所,2016.

NIU Gong-jie, QIAN Li-xin, LIANG Bing, et al.Experimental study on effect of pressure mitigation structure on reaction of charge with strongly constrained shell[R]. Mianyang: Institute of System Engineering, CAEP, 2016.